

High-Density Image Recording by Holographic Method

Yoshito TSUNODA

(Received on October 17, 1973)

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.

5 (280, Higashikoigakubo 1-chome, Kokubunji-City, Tokyo)

4. Random Phase Sampling as a High-Density Recording Technology

10 A random phase sampling method developed by the authors is explained in detail below as a novel basic technology relating to high-density, high-quality holograms for image information. ²⁵⁾²⁶⁾

4.1 Principle and Basic Structure

15 The present method relates to the creation of an image information hologram that allows creating a hologram on the entire Fourier transform plane, carrying out high-density recording at the diffraction limit, and fully eradicating speckle noise while preserving a high
20 redundancy.

The basic constitution of this method is illustrated in Fig. 5. The image information to be recorded is arranged in the center of a lens-Fourier transform optical path, in close contact with a sampling mesh and a random phase shifter.
25 Laser light beams passing through this system are first amplitude-modulated on the basis of the information and

in accordance with the distribution thereof. The beams are
periodically division-sampled next by the sampling mesh.
The sampled beams are then imparted a random phase by
the random phase shifter, to create a hologram on the
entire Fourier transform plane.

Fig. 5 Constitution of the random phase sampling method

4. 2 Characteristics of the method

The characteristics of the above-described random phase
sampling method can be summarized as follows:

- (1) The image information hologram can be created
theoretically wholly free of speckle noise.
- (2) High-density information recording can be achieved at
the diffraction limit.
- (3) A high-diffraction efficiency hologram is obtained.
- (4) High redundancy is achieved.
- (5) High resolution can be obtained as required.

総 合

ホログラフィックな高密度画像記録

角 田 義 人*

(1973年10月17日受理)

High-Density Image Recording by Holographic Method

Yoshito TSUNODA

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.
(280, Higashikoigakubo 1-chome, Kokubunji-City, Tokyo)

1. は じ め に

画像情報記録手法としてレーザ・ホログラフィ技術の優位性については従来数多くの記述がある。しかしながら、画像・文書などの情報保存手段としてその立場を確立するためには、情報記録密度、記録の冗長度、ホログラム再生像中に出現するスペックル雑音などの問題に関する基礎技術の開発が重要となる。本報告は、従来これらの問題点解決を目的として開発されて来た諸技術に関する記述を行ない、さらに筆者らの開発したランダム・フェーズ・サンプリング法について詳しく記述することによって、ホログラフィックな高密度画像記録に関する現状の技術水準ならびに将来展望を明確にすることを目的としている。

ホログラフィックな情報記録は、当初(1967~70年)デジタル電子計算機のメモリとして有用とされ、多くのその方向での研究業績がある。¹⁾²⁾³⁾とくに本報告中に記述するランダム・フェーズ・サンプリング法の背景としては、高密度デジタル情報記録に関する Burckhardt⁴⁾、武田⁵⁾、Stewart⁶⁾らの研究がある。ここで開発されたランダム・フェーズ・シフト法は少なくともデジタル情報の扱いでは完全に成功をおさめている。

一方、画像記録を狙ったアプローチとしては、Bartolini、Hannan⁷⁾らのビデオパッケージへのホログラフィの応用の試みがなされている。ところが画像の高密度記録は上記

デジタル情報の扱いに比較して大幅に遅れていた。それは画像の1頁分の情報量がデジタルの場合に比較して 10^3 倍も大きいことを、およびスペックル雑音という本質的なむずかしさに依存する困難さがあるからである。このギャップを埋めて、画像のビデオパッケージシステムやファイルシステムへホログラフィ技術を導入する基礎を築こうという流れに沿ってランダム・フェーズ・サンプリング法の開発も着手されたのである。

本報告は次のような構成となっている。まず、第2章では画像記録技術としてホログラフィの有する特徴ならびに問題点について説明する。第3章では従来の画像ホログラム作成手法についての詳しい記述を行なう。第4章、第5章では、高密度画像記録技術としてランダム・フェーズ・サンプリング法について説明する。つぎに、カラー画像を対象とした高密度技術に触れる。第7章では、特殊な画像情報として超高分解能情報の記録技術について説明する。そして最後にこれらの諸技術を基本として各種応用装置について説明を行なう。

2. 画像情報記録技術としてのホログラフィ

2.1 画像情報の一般的特徴

情報記録という観点から考えると画像情報の特徴は2つある。まず第1に、1頁分の情報量がデジタル情報に比較して非常に多いことである。通常1頁分の画像情報は、中間調を考えないで $10^9 \sim 10^{10}$ ビット⁸⁾、これに中間調、カラーまで考えるとさらに情報量は多くなる。情報量がこのように大きくなってしまふのは、肉眼の限界

を越えた高分解能を画像情報自身が有していることによる。これだけの情報量をそのまま記録しようとする、記録材料に対する負担は非常に大きいものとなってしまう。肉眼で情報を認識する場合には何らかの形で最低必要線まで情報量を低減して記録した方が能率的といえる。第2の特徴は、情報の構成空間周波数の分布が広帯域にわたっており、しかも情報によってその分布が不定ということである。1頁分の情報中には白紙に近い低周波成分からなる部分から、微細模様のような高周波成分からなる部分までが混在している。これらの成分は情報を認識するのに必要な範囲ですべて記録されなければならない。ところが一般に各成分の情報量はアンバランスな分布をしており、とくに低周波成分情報量が多い場合には、実際に情報の記録を行なう上で技術的なむずかしさをもたらしてしまう。

2.2 画像ホログラム作成法

画像ホログラム作成法は、撮影の光学系の組み方で次のように分類される。⁹⁾ ①フレネルホログラム、②フラウンホーファホログラム(フーリエ変換ホログラム)、③イメージホログラム。これらはつぎのように区別される。Fig.1においてレンズ L_1 の左方からの物体光をレンズの焦点面以外の面 P_1 で捕え参照光との間に干渉縞を作成するものがフレネル型、焦点面 P_2 で捕えたものがフラウ

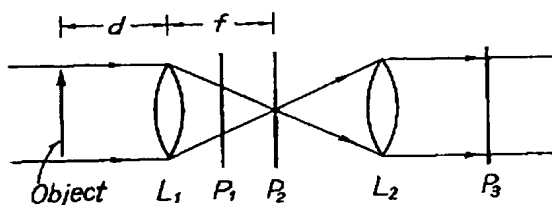


Fig. 1 画像ホログラム作成法の分類

ンホーファ型。その場合、 $d=f$ ならばフーリエ変換型、レンズ L_2 を通過後結像面 P_3 で捕えたものがイメージ型である。フラウンホーファ型の場合は信号強度分布は物体のフーリエ変換となる。これら以外にレンズレス・フーリエ変換方式があるが、この場合は参照光として平面波を用いない。これらの手法は各々その特色を有しているが、情報の高密度記録という点では、記録面積のもっとも小さくなるフーリエ変換型がすぐれている。

2.3 ホログラフィ技術の特徴と問題点

画像ホログラムに要求される条件を整理すると以下のようになる。

- (1) 高密度に記録が行なわれること。
- (2) 高冗長度を有すること。
- (3) 高回折効率を有すること。
- (4) 高解像度を有すること。
- (5) 低雑音であること。
- (6) 高階調特性を有すること。

(1)の条件を満足させるには、ホログラムの作成方を選んでやる必要がある。前節に述べたようにフーリエ変換型ホログラムが最も高密度の記録に適している。しかし、単純にフーリエ変換型を用いたのでは高密度記録は可能になったとしても、他の条件が失われてしまうことになる。これは次の理由によるものである。広帯域幅を有する情報をレンズ等によってフーリエ変換した場合しばしば起こる現象として、フーリエ面上中心点付近に大きな光エネルギーのピークを生ずることがある。これは情報の低周波成分の集中である。いま低周波から高周波まですべての情報が必要な場合を考えると、各情報空間周波数はすべて記録されなければならない。ところが感光材料の記録特性を考えると、そのダイナミックレンジは有限であるから、強度の小さい高周波成分に動作点をあわせると低周波成分はダイナミックレンジからはずれてしまい、線形的情報記録はされなくなる。逆に動作点を低周波部にあわせると高周波部はノイズレベルに入ってしまう。このような非線形記録は再生像中の大きな雑音源となり、しかも回折効率を低下させてしまう。フーリエ変換型以外のホログラム作成法はあまりにも記録面積を大きくしてしまい、高密度記録手法として用いることはできない。したがって上記フーリエ変換方式の問題点を何らかの形で解決する手法を開発する必要がある。

(2)の冗長度はホログラム記録の有する大きな特徴の一つであり、記録の機能性を表わすものである。ここで冗長度の定義をはっきりさせておくと、情報面座標をホログラム面座標との間に1:1の位置対応がなく、ホログラムの部分的欠損が情報面での局所的な情報欠損に対応しないことを意味する。^{*}高冗長度を得るための記録方式は2つある。¹⁰⁾1つは完全フーリエ変換ホログラム作成方

* つまり、ホログラムの1部が欠けても、情報面では情報を認識するのに必要な特定な情報が欠損しないで、全体として得られる情報量がほとんど変化しないことを意味する。

式であり、もう1つはディフューザ方式である。¹¹⁾ 前者は前述したようにダイナミックレンジの問題があるためそのままの形では用いられず、後述するようにある程度冗長度を犠牲にした手法が従来用いられてきた。ディフューザ法は、ホログラム作成の際にスリガラス等の光拡散素子によって画像情報光のホログラム面上での空間周波数分布を乱すことによって記録に高冗長度をもたせるものである。しかしこの手法ではスペックル雑音が非常に問題となる。スペックル雑音は情報の、記録再生の過程における欠損に起因するものである。詳しい説明は次節でおこなう。

(3)の回折効率は(1)で述べた情報光分布の問題と大きく関連している。一定のホログラム面積の中での情報光分布が均一でない場合には、干渉縞はそれに対応して不均一な分布をし、一様な情報光再生が行なわれず回折効率が低下してしまう。なるべく均一な情報光分布をもつホログラムを作成する必要がある。

(4)の解像度は、光源の大きさ、感光材料の粒状性、収差などによって影響を受けるが、ホログラムの大きさが有限であることに起因する回折限界によって主に決定される。つまり、情報に対して所望される空間周波数に対応するホログラム径が確保されれば、所望の解像度は得られることになる。

(5)の雑音の中で主なものとしては、非線形記録に基づく雑音¹²⁾とスペックル雑音¹³⁾がある。非線形雑音は、前述した感光材料のダイナミックレンジの狭さによって生ずるものである。一方スペックル雑音は、従来の画像ホログラムで最も問題となっていたものであり、従来それに関する多くの解析、対策がなされている。

(6)の階調特性は、ホログラム作成全行程の広義な意味での伝達関数特性によって決定される。伝達関数が広帯域で線形であることが高階調特性を得るために必要となる。

2.4 スペックル雑音の本質

スペックル雑音はホログラム再生像中に発生する斑紋状の雑音であり、その発生過程から分類して次の3つのタイプに区別される。

- (1) ホログラム記録時にすでに発生しているタイプ
- (2) ホログラム再生時に発生するタイプ
- (3) 再生像観察時に発生するタイプ

この分類はどの時点で雑音が発生するかという観点から行なったが、各々の雑音を解析してみると共通の原因

によっていることがわかる。以下の説明においては各タイプの雑音の本質的な原因を考えながら話をすすめて行く。

まず(1)のタイプでは、ホログラム記録時においてホログラム面上の情報光の分布がすでにスペックル雑音成分を有している。これは、ランダムな方向から情報に達する照明光同志が相互干渉することによって生ずるものであり、この現象にはレーザー光のコヒーレント性が大きく作用している。

(2)のタイプは、情報の再生時における情報の欠損から生ずるものであり、もっとも代表的なものと見える。この種のスペックル雑音の説明を行なうために、その典型的なホログラム作成系をFig. 2に示す。画像情報と、これに接して配置されているスリガラスなどの拡散板に、

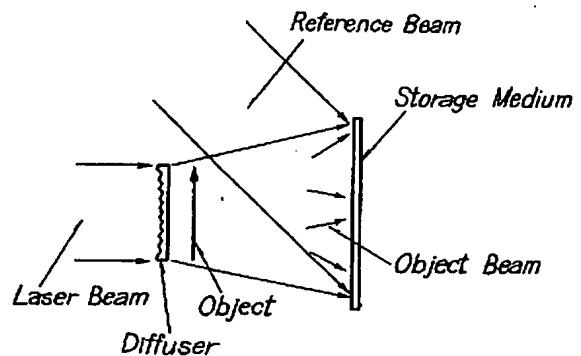


Fig. 2 スペックル雑音の出るホログラム作成系

レーザー光束を照明する。情報と拡散板を通過した光束は情報に基づく振幅変調の他に拡散板によるアットランダムな位相変調を受ける。これによって情報からの波面は乱れるが、感光材料上の一点には情報全体からの光が一樣に到達する。これを情報光としてホログラムを作成すると、冗長度の高い情報記録が行なわれる。このようなホログラムの面積が十分大きく、拡散板と情報を通過した光の回折波のすべてを記録したとし、かつ読み出し用のレーザー光束径が十分大きいとすれば、再生像はもとの情報とアットランダムな位相のすべてを含んでおりスペックル雑音は発生しない。しかし通常は有限の径でしかホログラム再生を行なえない。そこで再生された光はもとの情報上のある一点を完全に再生するに十分な情報を有していない。その結果スペックル雑音が発生する。今、ホログラムと拡散板の距離を l 、ホログラムの直径を d_h 、レーザー波長を λ とすると、 $d = 1.22 \frac{\lambda l}{d_h}$ で示される

λ だけの有限分解能を再生像に与える。たとえば $l/d_h = 10 \sim 110$, $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ とすると、約 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ のぼけが起きる。ある一点に着目して、このようなぼけがあるということは、その点の近傍の各点の再生の光もこの面積の中へ入ってくることになり、波面間の干渉が起こる。これがスペックル雑音の原因となる。以上のスペックル雑音については Gerritsen,¹³⁾ Reinheimer, Copple¹⁴⁾ らが実験を行なっており、Gabor 他¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾ によって理論的な解析がなされている。

(3)のタイプのものは、ホログラム再生像をスクリーン上に観察する際に生ずるものである。つまり、スクリーン面のざらざらが光を拡散する際、面からのレーザ光の散乱方向にマイクロに見て指向性があり、肉眼の有効ひとみに入らないレーザ光を生ずる部分と、入る部分が不均一に存在することによるものである。その対策としては、比較的簡単で有効な方法として、スクリーンをわずかに振動させたり、あるいは液晶パネルに電圧を印加して液晶分子をダイナミック・スキャタリングといわれる振動モードに制御する方法などがあり、ほぼ解決をみている。いずれもレーザ光の指向性を乱すことによって問題を解決している。

2.5 スペックル雑音対策

前節の(2)のタイプのスペックル雑音がホログラム自身の有する雑音でありもっとも問題となるものであるが、ここではこれに焦点をあわせて、従来スペックル雑音の除去法として提案されそれぞれ効果をあげたいくつかの方法を整理して論ずる。

(a) ホログラムの面積を必要十分なだけ大きくする。¹⁸⁾

これは極めて原理的な解決策である。前述で述べた通り、仮にホログラムの大きさが無限大で記録した情報の全部を再生すれば、スペックル雑音は生じない。しかし妥協して、ある有限の大きさの面積からの再生でスペックル雑音が生じていても、そのスペックル雑音の単位構造が像の分解能以下におさえられれば問題はない。Gerritsen らは実験的にこの効果を証明している。¹³⁾ しかしこの方法はホログラムの面積を大きくしてしまうので、画像情報記録素子としてホログラムを用いる場合には適当な手法とはいえない。

(b) 拡散板をとりかえて、多数のホログラムを作り同時再生する¹⁹⁾

1枚の拡散板で作成されるホログラムからのスペックル雑音の模様は、その拡散板に固有なランダム模様とな

るので、いくつかの拡散板を用いてホログラムを作り、それらからの像を平均化するように重ね合わせれば、スペックル雑音はかなり目立たなくなる。この手法は多数のホログラムを作るという繁雑さがあり、しかもホログラムの面積が全体として大きくなり、情報記録素子としてホログラム作成はあまり良い方法ではない。

(c) レンズ・フーリエ変換ホログラフィの方法(拡散板を用いない方法)

情報をホログラム面上に冗長度高く記録する方法として、レンズ・フーリエ変換方式がすぐれていることは先に記述した。この方法は情報光をレンズの焦点面へ集光することによりホログラムの面積を調節し得るため、(a)、(b)の方法のように本質的にホログラムの記録密度を低下させないですむように見える。しかし前述したダイナミックレンジの障害があり、それを何らかの工夫で取り除く必要がある。いくつかの手法が開発され、多少の妥協はあるがスペックル雑音の少ない良質なホログラムを作成することに成功した。具体的内容については次章で詳しく説明する。

3. 従来の画像ホログラム作成手法

ここでは、前述したホログラムの特徴を生かし、その問題点をある程度解決することに成功した従来の画像ホログラム作成手法について詳しく説明する。

前節で高冗長度を保ちながらスペックル雑音をとり除く有望な手法としてレンズ・フーリエ変換法があることを示した。この手法は情報の記録面積を小さくできることから画像の高密度記録に適しているといえる。しかし、感光材料のダイナミックレンジの問題を有しており、従来この問題点に集中してレンズ・フーリエ変換手法の利点を生かそうと以下に示す手法が開発されてきた。なおこれらの手法以外にも、画像ホログラムの作成手法として、ディフューザ法を改良したもの、¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾あるいはイメージホログラム法などの開発がすすめられているが、ここでは情報の高密度記録ということにポイントをおいてそれらの手法に関する説明を省略する。

3.1 デフォーカス法

デフォーカス法とは、ホログラム内での情報光分布の一樣化を計るためホログラム作成にあたって感光材料をあえてレンズの焦点位置からずらして配置する方法である。²²⁾ この場合、焦点距離 f に対してずらす量 Δf は情報の大きさ、内容などによって異なってくる。Fig.3

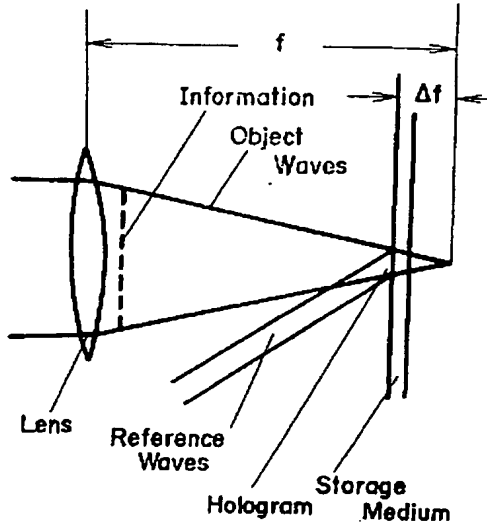


Fig. 3 デフォーカス法の構成

にデフォーカス法の構成を示す。この手法によって感光材料のダイナミックレンジの問題はある程度解決される。しかし、画像情報を記録する場合、実際にはズレの量 Δf をかなり大きくしてやる必要があるためホログラム径は大きくなり記録の高密度性が失われてしまう。逆に密度を高くしようとすると情報の一部が欠損してしまう。さらに、 Δf が大きい場合、周辺部の情報はホログラム面でも周辺部に記録され、本来フーリエ変換ホログラムの特徴である記録の冗長性が失われてしまう。これを数式的に詳しく説明してみる。

デフォーカス法においてホログラム面をレンズの焦点位置からずらして配置することは、丁度情報に位相板を重ねたと等価に考えられる。²³⁾ 今、簡単のために1次元で話を考えると、その位相形状は近似的に

$$y = Ax^2 \quad (1)$$

となる。ここで x は情報の光軸からの距離、 y は位相の大きさである。 A はデフォーカス量 Δf から次のように決定される。

$$A = \frac{\pi \Delta f}{f^2 \lambda} \quad (2)$$

(1)式で示すように放物線状に位相が与えられるということは、近似的には情報の座標 x_0 の点に $y_0 = 2Ax_0$ の勾配を持ち $0 \sim 2\pi$ に分布する直線による位相を与えたことと等しいと考えられる。このような勾配を有する位相が与えられた場合、その位相下にある情報のフーリエスペクトルはフーリエ変換面で中心位置がずれることに

なる。数式で示すと、 $y = (2Ax_0)x$ なる直線状位相項が与えられた場合、情報の分布を $f(x)$ とするとそのフーリエ変換 $F(\xi)$ は

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp[i(2Ax_0x)] \cdot \exp(-i \frac{2\pi x \xi}{f \lambda}) dx \quad (3)$$

となる。 $F(\xi)$ の中心位置 ξ_0 は次の条件を満足させることによって与えられる。

$$-\frac{2\pi \xi_0}{f \lambda} + 2Ax_0 = 0 \quad (4)$$

したがって

$$\xi_0 = \frac{f \lambda A x_0}{\pi} \quad (5)$$

となる。(2)式を代入すると

$$\xi_0 = \frac{\Delta f x_0}{f} \quad (6)$$

となる。(6)式から明らかなように、 x_0 が大きいと ξ_0 も大きくなり、情報面で中心から離れた情報ほどホログラム面でも外側に行ってしまう、記録の冗長性がなくなってしまうことがわかる。さらに Δf が大きくなる程、その割合も大きくなるのがわかる。 Δf をどの程度の値に選んだらよいかは一概には決めかねるが、デジタル情報に関してはある程度のことがわかっている。²²⁾ 画像情報に関してはもともと情報量自身がデジタルに比較して多いので、 Δf は比較的大きくする必要がある。

以上説明したように、デフォーカス法はレンズ・フーリエ変換法を改善するすぐれた手法であるが、

- (1) デフォーカスによって情報の記録密度はある程度低下する。
- (2) ホログラムの特徴である記録の冗長性が不完全となる。
- (3) 対象となる情報が変化する度にデフォーカス量は実験的に選びださなければならない。

などの不都合が伴う。

3.2 マルティプル・オブジェクト・ビーム法

デフォーカス法で問題となった記録の冗長度の不完全性を改善するために、Hannanらは回折格子を用いることによって複数個のホログラムからの重ね合わせとして像を再生することを提案した。¹³⁾²⁴⁾ 手法の構成をFig.4に示す。入射平行光束は回折格子で回折され、各次数の光は物体を透過した後レンズ・フーリエ変換される。感光

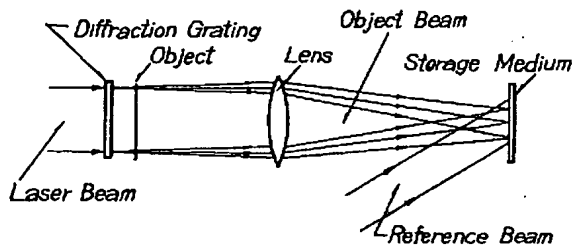


Fig. 4 マルティプル・オブジェクト法の構成

材料はフーリエ面からわずかにデフォーカスして配置されたホログラムが作成される。このような系で回折格子に入射した強度 I_0 の光束はフーリエ変換面上では1次元で考えて(7)式のような強度分布 I となる。

$$I \propto \left[\sin c \left(\frac{k s p}{2} \right) \right]^2 \left[\frac{\sin \left(\frac{N k d p}{2} \right)}{\sin \left(\frac{k d p}{2} \right)} \right]^2 \quad (7)$$

ここで、 k は波数、 s は回折格子のスリット幅、 d はピッチをあらわしており、 p は回折の次数を m として、主極大の方向で

$$p = m \frac{\lambda}{d} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

を意味している。(7)式において第2項目は単一スリットによる回折光、第3項目は各スリットからの回折光同志の干渉をしている。第3項の主極大値は、各回折の次数に対応しており各々の情報を含んでいて、サブホログラムを形成することになる。こうして情報全体を複数個のサブホログラムに記録することによって冗長度を高めている。つまり、再生の際にいくつかの次数のサブホログラムに欠損を生じても、他の次数のサブホログラムから像は再生されるため、多少像は暗くはなるが完全に損われることはなくなる。また、この手法では光の回折方向が制御されているので情報のランダムは欠損はなく、スペckル雑音は生じない。この手法において冗長度をさらに上げるには、サブホログラムの数を増してやればよい。しかし、これは逆に記録面積を増加させることになり記録密度の低下を招いてしまう。一定の記録面積中に含まれるサブホログラムの数を増してやるには、光学系のパラメータを一定にした場合、回折格子のピッチを大きくすればよい。しかし、これは再生像中に格子パターンを出現させることになり、像の解像力を低下させてしまう。

結局、この手法は記録の冗長度を高くすることはできるが、画像情報の高密度記録に適した方法とはいえない。

4. 高密度記録技術としてのランダム・フェーズ・サンプリング法

ここでは、画像情報の高密度高品質ホログラムに関する新しい基礎技術として、筆者らが開発したランダム・フェーズ・サンプリング法についての詳しい説明を行なう。²⁵⁾²⁶⁾

4.1 基本構成と原理

本手法は、画像情報ホログラムの作成に関して、完全フーリエ変換面でのホログラム作成を可能にし、回折限界での高密度記録を行ない、高冗長度を保ちながらスペckル雑音を完全に追放せしめるものである。

この方法の構成をFig. 5に示す。記録される画像情報は、サンプリング・メッシュとランダム位相板に密着

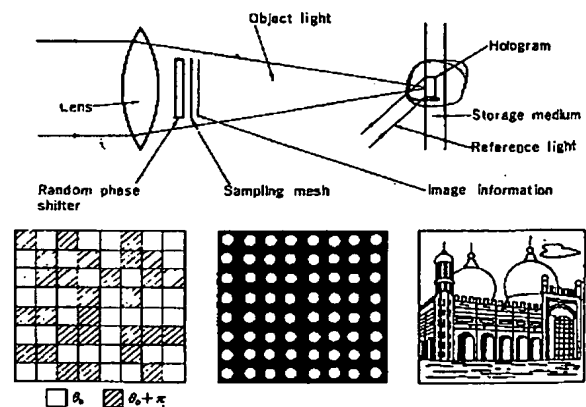


Fig. 5 ランダム・フェーズ・サンプリング法の構成

してレンズ・フーリエ変換光路中に配置される。これらの系を通過したレーザ光束は、まず情報によってその分布に応じた振幅変調を受ける。次にサンプリング・メッシュによって周期的に分割サンプリングされる。そして各サンプリング光束はランダム位相板によってアットランダムな位相を付加されて、完全フーリエ変換面上にホログラムを構成する。

この手法の効果は、(1)サンプリング定理、(2)ランダム・ウォーク、(3)レイリー条件、3つの原理に基づいて証明される。²⁷⁾

(1) サンプリング定理

サンプリング手法によって、情報は周期的サンプリングを受ける。情報のもつ大量の低周波成分はサンプリングによってそのサンプル穴径に対応するスペクトル分布の帯域へとほぼ一様に分散させられる。したがってフーリエ面上での情報帯域内の光エネルギーのアンバランスが小さくなり分布が一様化され、ダイナミックレンジの問題が解決できる。サンプリングのピッチは情報の帯域に対してサンプリング定理を適用することで決定される⁽²⁸⁾。つまり、サンプル点の数を所望の分解能の Line Pair に対して 2 個ずつ取り、しかもサンプリングの穴径を Line Pair の線幅に等しくとってやれば、近似的に情報の帯域は保存されたことになる。通常の TV 画像程度の分解能に対しては画像情報一画面を 25 万点程度でサンプルしてやれば良い。高解像度 TV 画像に対応すれば、100 万点のサンプリングを行なう。今、情報の画面サイズを $50 \times 50 \text{ mm}$ とすると、サンプリングのピッチは 25 万点の場合 0.1 mm 、100 万点の場合 0.05 mm となる。こうしたサンプリングによって画像情報の空間周波数が一様化されると同時に、情報量の大幅な低減が行なわれる情報が周期構造を有している場合、サンプリングメッシュとの間にモアレ縞が出現することが心配されるが、これはメッシュの穴径を大きくすることによってそのコントラストを小さくすれば実際上はほとんど目につかない程度にできる。

(2) ランダム・ウォーク

情報のサンプリングを行なった場合、空間周波数の均一化は行なわれるのだが、サンプリング数が多くなるにつれてフーリエ面上では各サンプル点からの情報光の自己干渉効果によるスペクトルの集中がサンプリングのピッチから決まる位置に生じてくる。この情報光スペクトルの集中はやはりダイナミックレンジの問題と関連して再生像を劣化させることになる。これを解決するために Fig. 5 中のランダム位相板 (ランダム・フェーズ・シフタ) が用いられている。これは情報の各サンプル点を通してレーザー光にサンプル点内では全く一様であるがその配列に関しては全くランダムな位相を付加するものである。ランダム・フェーズ・シフタはたとえば光学ガラス板上に誘電体物質を段階関数的に多層蒸着することによって作成される。ランダム・フェーズ・シフタの効果は、すでにデジタル情報に関して理論的、実験的に示されている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ サンプリング法と組み合わせることに

によって、従来デジタル情報に対してのみ有効であったランダム・フェーズ・シフタを画像情報にまで展開させたわけである。ランダム・フェーズ・シフタの効果は、位相ベクトルのランダム・ウォークの考え方によって説明される。それを以下に数式的に示す⁽²⁸⁾

サンプリング・メッシュとランダム・フェーズ・シフタを通過した情報光のフーリエ面上での回折光複素振幅 $u_1(x, y)$ は (9) 式で示される。

$$u_1(x, y) = Cr \int_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(\xi - mPd, \eta - nPd) \cdot H(m, n) \exp[i\theta(m, n)] \cdot \exp\left[-i \frac{2\pi(x\xi + y\eta)}{f\lambda}\right] d\xi d\eta \quad (9)$$

ここで

- $u_1(x, y)$: フーリエ面上回折光複素振幅
- Cr : 規格化定数
- (ξ, η) : 情報面での直交座標
- (x, y) : フーリエ面での直交座標
- (m, n) : サンプル点の番地
- Pd : サンプル点の配列ピッチ
- d_D : サンプル点穴径
- f : レンズの焦点距離
- λ : レーザ波長
- $\theta(m, n)$: (m, n) 番地のランダム位相値
- $H(m, n)$: (m, n) 番地の階調

$$T(\xi, \eta) = \begin{cases} 1 & : \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \leq d_D/2 \\ 0 & : \sqrt{\xi^2 + \eta^2} > d_D/2 \end{cases}$$

である。ここで $H(m, n)$ は有限の段階、 H_1, H_2, \dots, H_K をもっているとする

$$u_1(x, y) = Cr \sum_{k=1}^K H_k \int_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{N^{(k)}} T(\xi - mPd, \eta - nPd) \cdot \exp[i\theta(m, n)] \exp\left[-i \frac{2\pi(x\xi + y\eta)}{f\lambda}\right] d\xi d\eta \quad (10)$$

とかける。 $\sum^{(k)}$ は $H(m, n)$ が $H_k \pm \Delta H$ 以内のものについてのみ和をとることを意味する。ただし、 $\Delta H = (H_k - H_{k-1})/2$ である。(10) 式を整理するとつぎのようになる。

$$u_1(x, y) = Cr \sum_{k=1}^K H_k \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{N^{(k)}} \exp[i\theta(m, n)] \exp\left[-i \frac{2\pi(x\xi + y\eta)}{f\lambda}\right]$$

$$+ i \frac{2\pi(mx+ny)Pd}{f\lambda}] F(x, y) \quad (11)$$

ここで $F(x, y)$ は

$$F(x, y) = \frac{d_D/2f\lambda}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}} \cdot J\left(\frac{2\pi d_D/2}{f\lambda} \sqrt{x^2+y^2}\right) \quad (12)$$

である。ただし J_1 は1次のベッセル関数である。(11)式において $F(x, y)$ の係数中 $\theta(m, n)$ はランダムな位相量をもっているの、 $u_1(x, y)$ の2乗で与えられるホログラム面上での情報光強度は、特定の x, y の値に対してピークをもつことはない。したがって強度分布は $F(x, y)$ にそった形となり一様化される。

(3) レイリー条件

情報のサンプリングとランダム位相の付加によって、完全フーリエ変換面での情報の分布が一様になり、ダイナミックレンジの問題が解決される。しかもこの場合、ホログラムは完全フーリエ面上に作成されているのでデフォーカス法の場合のような情報の偏在がなくなり高冗長度が得られる。記録密度に関してはどうなるであろうか。ホログラムの径はレイリー条件からサンプル点穴径に対応する Airy Disk 径として一義的に決定され²⁹⁾ しかもこの径の中に各サンプル点からの情報はほとんどすべて分布することになる。したがってこの径でホログラムを再生してやると、サンプル点の集合である情報全体も必要成分を全く失うことなく再生されることになる。これはサンプルされた情報がホログラムに変換され、さらに再生像に変換される間に、その一部分でも失われることがないことを意味し、先に論じたスペckル雑音が再生像中に全く生じないことが了解される。しかもホログラム径は上に述べたようにサンプル点穴径の Airy Disk 径として決定されるので、理論的に回折限界の高密度で情報を記録することができることになる。

4.2 方式の特徴

以上述べたランダム・フェーズ・サンプリング法の特徴点を整理すると次のようになる。

- (1) 理論的にスペckル雑音の全くない画像情報ホログラムを作成できる。
- (2) 回折限界の高密度で情報を記録できる。
- (3) 高回折効率のホログラムが得られる。
- (4) 高冗長度が得られる。

- (5) 必要十分な高解像度が得られる。

5. ホログラム作成実験

ランダム・フェーズ・サンプリング法を用いた高密度ホログラム作成に関する実験についての詳細な説明を行なう。²⁵⁾²⁶⁾

5.1 ランダム・フェーズ・シフタの試作

ランダム・フェーズ・サンプリング法を具体化するために実際に1フレーム画像情報に対して25万点サンプリングおよび100万点サンプリングのランダム・フェーズ・シフタならびにメッシュを作成した。フレームサイズを $50 \times 50 \text{ mm}$ とするとサンプリングピッチは各々 $100 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ となる。作成の行程を以下に示す。

- (1) コンピュータによって100万点 (1000×1000) の乱数を発生させる。
- (2) それに基づいて 1000×1000 のランダムマスクパターンを作成する。(Fig. 6 参照)

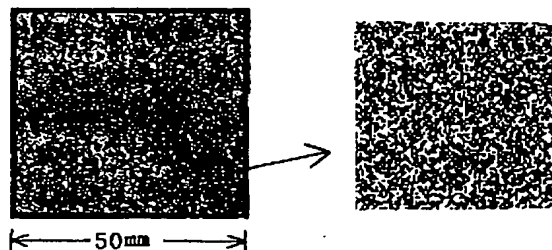


Fig. 6 100万点ランダムマスクパターン

- (3) マスクパターンに基づいて、光学ガラス基板上に透明誘電体を蒸着する。
- (4) さらにその上に位置対応をとってサンプリング・メッシュを蒸着する。

透明誘電体の蒸着の段階数は $0, \pi$ の2段階である。段階数をさらにふやす方が、位相板の効果を考えると望ましいが、2段階でも十分な効果を示しうる。とくに、デジタル情報の場合と異なり乱数的な位相分布形状と肉眼にとって意味のある画像情報分布形状間の相関を考えに入れる必要がほとんどないことは特記すべき事項である。以下に試作したランダム・フェーズ・シフタの特徴点を示す。

- ① サイズ: $50 \times 50 \text{ mm}$
- ② 蒸着段階数: 2
- ③ サンプル点数: 10^6 (2.5×10^5)

- ④ 誘電体材質: 酸化セリウム, 硫化亜鉛他
- ⑤ メッシュ材質: Ag, Al
- ⑥ 使用波長: $0.4880\mu\text{m}$ ($0.6328\mu\text{m}$)

5.2 実験結果

ランダム・フェーズ・サンプリング法の効果を実験的に確認した。使用光源はAr レーザ ($0.4880\mu\text{m}$), 書込用フーリエ変換レンズは $F=1.4$, 乾板はKodak120-01を漂白処理して用いた。情報は $50\times 50\text{mm}$ のフィルムを使用しランダム・フェーズ・シフタ(メッシュ)と密着してレンズと乾板の間に置かれている。サンプル点数は 10^6 点である。乾板はレンズの完全焦点面にある。こうして作成したホログラムと、それからの再生像をFig. 7 (a)(b)に示す。ホログラム径は 2mm , 回折効率 20% 以上である。再生像中にスペckル雑音は見当らない。解像度はTVテストパターンで800本/画面, 階調は8段階が得られている。

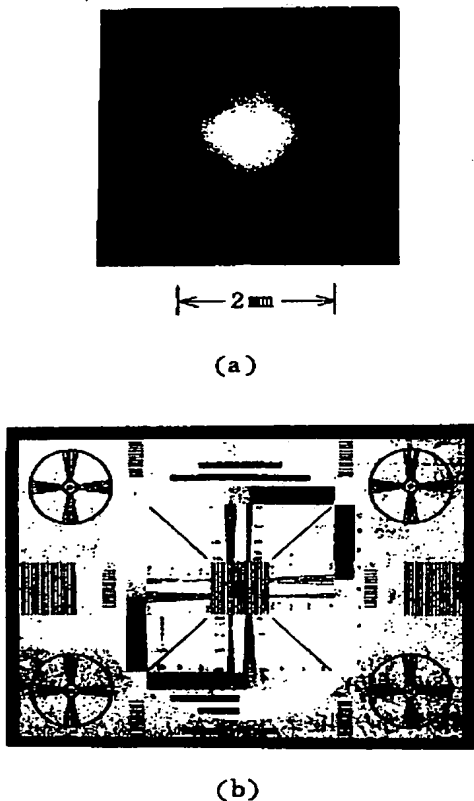


Fig. 7 ランダム・フェーズ・サンプリング法による
(a)ホログラム ($2\text{mm}\phi$)
(b)再生像

5.3 諸特性の定量的検討

ランダム・フェーズ・サンプリング法ホログラムから

の再生像質に関して、とくにその雑音特性、階調特性、解像度特性の点について定量的評価を行なってみる。³⁰⁾

(I) 雑音特性

サンプリングを行なうことによって再生像中にはそれに対応した強度変調が生ずるわけであるが、その各ピーク値の包絡線のゆらぎが小さければ、再生像の S/N は確保されたことになる。実際の測定結果と従来のスペckル雑音による強度ゆらぎとの比較を行なった。³¹⁾ 実験は次のようにして行なわれた。白色の情報(完全に透明なもの)をランダム・フェーズ・サンプリング法と、ディフューザ法で各々ホログラムに記録し、再生像をフィルムに撮影する。このフィルムをマイクロフォトデンストメータでトレースして強度のゆらぎを測定する。各強度ピーク値の2乗平均をとり各々の手法について比較する。Fig. 8にランダム・フェーズ・サンプリング法によるゆらぎを示す。一方、ディフューザ法によるスペckル雑

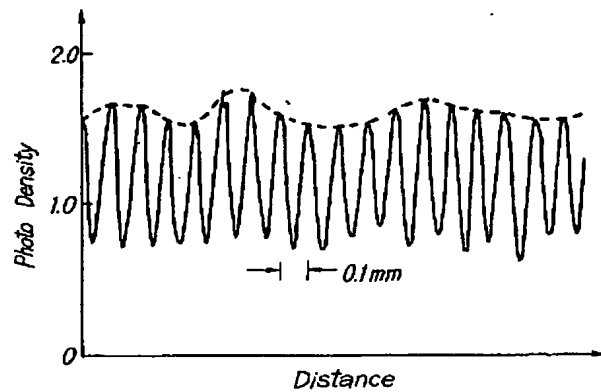


Fig. 8 ランダム・フェーズ・サンプリング法による再生像上の強度のゆらぎ(点線部分)

音のゆらぎをFig. 9に示す。両者の強度ゆらぎの大きさ F を次式に基づいて求めた。

$$F = \frac{\langle [A(J) - \langle A \rangle]^2 \rangle}{\langle A \rangle^2} \quad (13)$$

ここで、 A はトレース曲線の各ピーク値、 $\langle \rangle$ は平均を意味する。 J は平均をとるために用いたピークの数である。 10^6 点サンプリングを行なった場合の F 値をFig. 10 (a)に示す。この場合 $J=500$ である。Fig. 10(b)に 2.5×10^5 点サンプリングの場合の F 値を示す。ゆらぎの大きさは両者ともほぼ等しい。各々の図にディフューザ法の場合の F 値を示してある。ランダム・フェーズ・サンプリング法の場合のゆらぎの大きさはスペckル雑

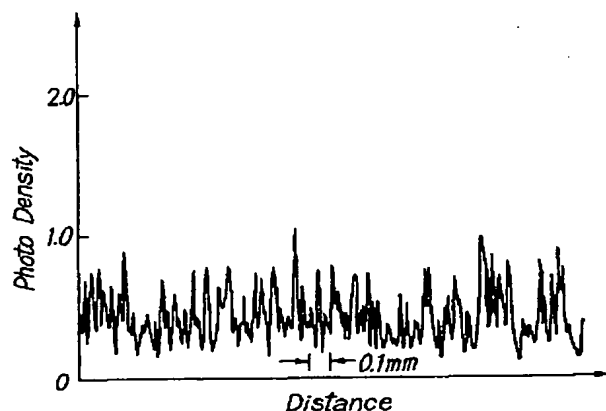
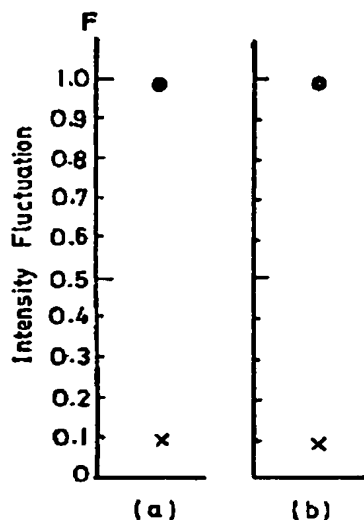


Fig. 9 ディフューザ法によるスペックル雑音の強度のゆらぎ



● : スペックル雑音
× : ランダム・フェーズ・サンプリング法

Fig. 10 再生像の強度ゆらぎ F
(a) 10^5 サンプリング
(b) 2.5×10^5 サンプリング

音に比較して1/10以下になっており, S/N が大幅に向上していることがわかる。

(2) 階調特性

以下に示す2つの面から階調特性を測定した。

① ランダム・フェーズ・サンプリング法の光学系, 材料, プロセスをすべて含めた広義の伝達関数の特性測定。

② オリジナル情報(グレースケール)の黒化度と再生情報の黒化度との相対的関係の測定。

まず①について説明する。Fig.11に広義の伝達関数の

構成を示す。階調特性はこの関数のふるまいによって大きく支配される。関数 T は参照光強度を一定にして, 入力つまり情報光強度を変化した場合 式(14)で定義される。

$$T = \frac{\eta}{K} \quad (14)$$

ここで, η は出力つまりホログラムの回折効率, $1/K$ は R/O 比を示している。ホログラムの平均露光量 E_0 をパラメータとして η と $1/K$ の関係を実験的にもとめた結果を Fig. 12 に示す。両者の関係は K の幅広い範囲で直線的になっており, 式(14)において T が K の変化に対して一定になっていることがわかる。

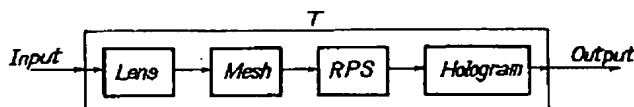


Fig. 11 ランダム・フェーズ・サンプリング法の広義の伝達関数

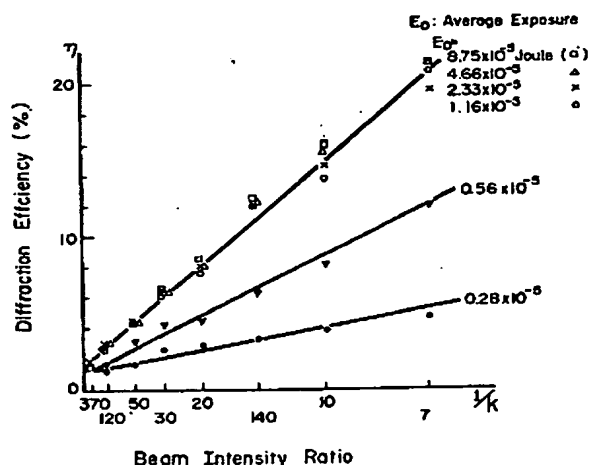


Fig. 12 回折効率と R/O 比の関係

つぎに②の手法について説明する。この手法はより直接的な階調特性の測定法といえる。10段階の階調を有するグレースケールのホログラムを作成し, オリジナル情報と再生情報の各階調の黒化度をグラフにプロットする。Fig. 13 にその結果を示す。幅広い範囲での階調線形性が得られている。この測定においてはフーリエ変換ホログラムにおいて同時に複数個の階調が記録されている場合の線形性がわかる。

以上説明した2つの測定の結果, ランダム・フェーズ・サンプリング法の階調特性の線形性が確認できた。

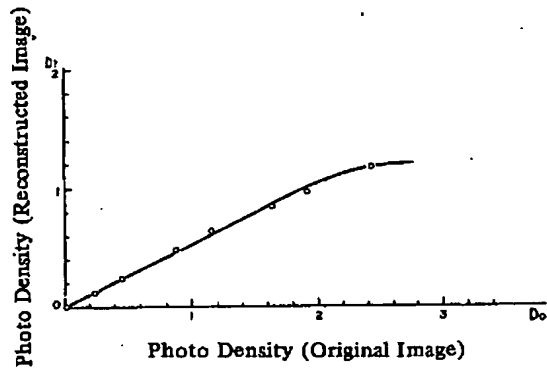


Fig. 13 オリジナル情報と再生情報の黒化度の関係

(3) 解像度特性

ランダム・フェーズ・サンプリング法の解像度は、情報のサンプリング数から決ってくる。本来サンプリング数は情報の必要とする解像度からサンプリング定理に基づいて決定されており、十分必要とする解像度を有しているわけであるが、ここではそれを実験的に示す。 10^5 サンプル点のランダム・フェーズ・シフトを用い、情報として数100 μm ～数10 μm までの線幅を有する数段階の大きさのアルファベット文字チャートを用いホログラムを作成した。再生像中の判読可能な最小文字線幅を測定した。Fig. 14にホログラム再生像を示す。実験の結果50 μm の文字迄判読可能であった。この値はサンプリングのピッチから決まる解像度と一致している。

以上、ランダム・フェーズ・サンプリング法に関する

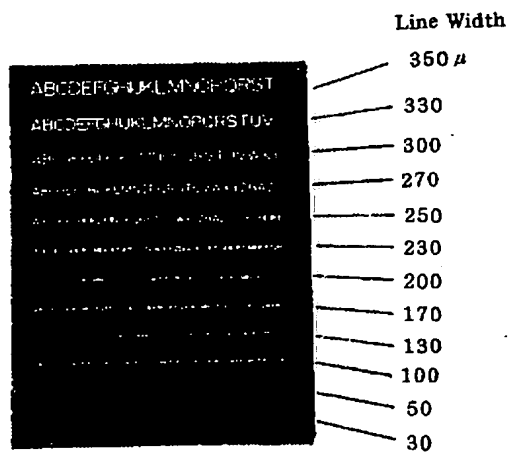


Fig. 14 再生像の解像度

3つの特性について定量的な結果を示したが、これらからわかるようにいずれも良好な結果を示している。

5.4 従来技術との比較

ここでは、従来のデフォーカス法、マルチプル・オ

ブジェクト・ビーム法、ディフューザ法と、ランダム・フェーズ・サンプリング法との比較を2.3節に示したホログラムの特徴点に関して行なってみる。その結果をTable 1に示す。

Table 1

方式 特徴	ランダム・フェーズサンプリング法	デフォーカス法	マルチプル・オブジェクト・ビーム法	ディフューザ法
1. 密 度	最高	中	中	最低
2. 冗 長 度	高	低	高	高
3. 回折効率	高	高	高	高
4. 解 像 度	高	高	高	中
5. 雑 音 (スペckル)	なし	なし	なし	大
6. 階 調	高	高	高	高

6. カラー画像情報のホログラフィ記録

1964年にLeithとUpatnieks³²⁾がホログラフィをカラー画像記録再生に用いることを提案して以来、種々の方式が提案されている。^{33) 34) 35) 36)} しかしながら、各方式が共通に有している問題点を抽出してみると、異なったレーザ波長間でのクロストークの問題が浮かび上がってくる。クロストークはゴーストイメージとも呼ばれ、たとえば3色のレーザを用いてカラーホログラムを作成した場合、赤で作られた干渉縞を青あるいは緑の光で再生することによって生ずる像の重なり合いのことをいう。正しい色彩像を観察するためには何らかの手段でこのゴーストイメージを取り除く必要があり従来手法が開発されて来た。しかしながらこれらの手法は、各々その利点を有してはいるが、いずれもカラー画像の高密度高像質記録の観点からは満足なものとはいえない。

カラー画像高密度ホログラム作成手法として、先に述べたランダム・フェーズ・サンプリング法を基本とするコンポジット・カラーホログラフィ方式の着想を得、良好な実験結果を得たので、それについての説明を行なう。

6.1 コンポジット・カラーホログラフィ方式³⁷⁾

方式の基本構成をFig. 15に示す。図においてレーザ光はレンズを通過後ランダム・フェーズ・シフト、メッシュ、カラー情報を通り感光材料上に収束される。レーザ波長は λ_1 , λ_2 , λ_3 の3つの異なる値を有しており、順次入射される。 λ_1 に対してはレンズは1の位置にあり、

感光材料上で同一波長の参照光と交わり、ホログラム H_1 が作成される。波長が λ_2 の場合はレンズの位置が2になり同様にホログラム H_2 が作成される。 λ_3 も同様である。こうして作成されたホログラム H_1, H_2, H_3 を各

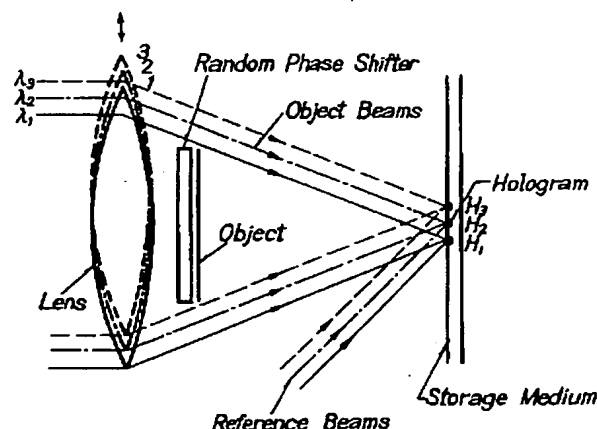


Fig. 15 ランダム・フェーズによるコンポジット・カラーホログラフィ方式の構成

各 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ で同時に再生すると3色の合成像がカラー像として再生されることになる。この方式では、各色の干渉縞は全く独立しているのでゴーストイメージが全く発生しない。しかも従来のコンポジット方式³⁴⁾のような色フィルタを用いたりする複雑なテクニックを必要としない。さらに各ホログラムはランダム・フェーズ・サンプリング法によって作成されており高密度になっている。したがってその3倍の微小面積にカラーホログラムを作成できることになる。カラーの再現性については、情報が各単一波長に対してもつ透過率の分布、つまり階調特性が重要な要素となるが、その点については前述したように良好な結果が得られている。

6.2 実験結果

実験は以下の条件に基づいて行なわれた。使用レーザーは He-Ne, Ar であり $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.5145 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 0.4880 \mu\text{m}$ である。ランダム・フェーズ・シフタは 10° サンプリング、感光材料は Kodak 120-01 乾板であり、これを漂白処理して用いた。カラー情報としては、一般的なカラー写真を用いた。単色ホログラムについて各々最適露光条件、R/O比を決定した後、それに基づいてカラーホログラムを作成した。3個のホログラムはレンズの移動によって3mm間隔に直線状に並べ

た。各ホログラムの径は2mmであり、回折効率は平均で15%を上回った。Fig. 16にホログラムからのカラー再生像を示す。色バランスを調節することによってオリジナル情報に忠実なカラー再生像が得られた。各単色ホログラムからの再生像は全く位置ズレなく重ね合わされたため色ズレは皆無といってよい。

6.3 カラーホログラム用ランダム・フェーズ・シフタ

従来のランダム・フェーズ・シフタは単一波長用に設計されたものであり、コンポジット・カラーホログラムを作成する際には、光源の波長が変わるたびにランダム・フェーズ・シフタを交換してやらなければならない。これはホログラム作成手続き上やはり面倒な問題である。ここではそれを解決するための複数波長に対して効果を発揮するカラーホログラム用ランダム・フェーズ・シフタについての説明を行なう。

今、波長 λ_1 の光に対してアットランダムな位相のズレを付与するランダム・フェーズ・シフタを考える。その構成は1次元もしくは2次元的に n 段階の量子化された位相を付与するものとなっている。各段階間の位相差は等しく θ とする。各々の位相値をたとえば小さい順に $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}$ とすると $\theta_{n-1} = (n-1)\theta$ となる。アットランダムな位相板として完全なものとなるためには位相ベクトルの総和が0となればよい。Fig. 17に位相ベクトルの分布の様子が示してある。図において k 番目の位相ベクトルの x 成分、 y 成分は15)のようになる。

$$\begin{aligned}(r_k)_x &= a \cos \theta_k = a \cos k\theta \\ (r_k)_y &= a \sin \theta_k = a \sin k\theta\end{aligned}\quad (15)$$

ただし a はベクトルの長さである。各々のベクトルの数が等しいと考えると、1組の r_0, \dots, r_{n-1} の総和が0となればよい。 x 成分、 y 成分の総和は式16)のようになる。

$$\begin{aligned}a \sum_{k=0}^{n-1} \cos k\theta &= a \cos \frac{n+1}{2} \theta \sin \frac{n\theta}{2} / \sin \frac{\theta}{2} \\ a \sum_{k=0}^{n-1} \sin k\theta &= a \sin \frac{n+1}{2} \theta \sin \frac{n\theta}{2} / \sin \frac{\theta}{2}\end{aligned}\quad (16)$$

16)の両式がともに0となるためには式17)の条件が必要である。

$$\sin \frac{n\theta}{2} = 0 \quad (17)$$

θ の満たすべき条件は

$$\frac{n\theta}{2} = m\pi \quad (m: \text{整数}) \quad (18)$$

したがって次式が得られる。



Fig. 16 ランダム・フェーズ・サンプリング法による
コンボジット・カラーホログラム再生像

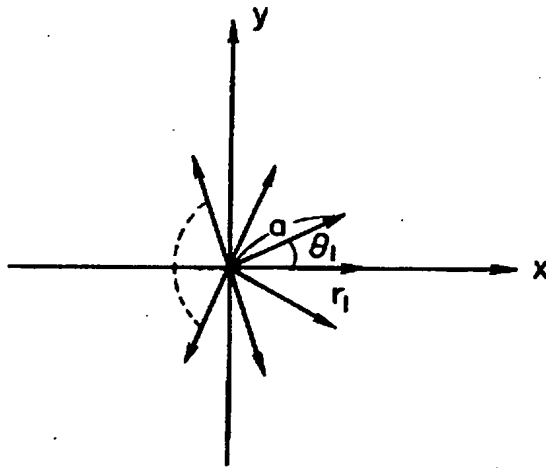


Fig. 17 位相ベクトルの分布

$$\theta = \frac{m}{n} 2\pi \quad (19)$$

式(19)が λ_1 に対して成立したとし、この位相板に λ_2 の光を入射したとする。 λ_1 に対して θ の値の位相差が λ_2 に対して θ' の位相差を与えるとすると、つぎの関係が成立する。

$$\theta' = \theta \lambda_1 / \lambda_2 \quad (20)$$

したがって式(19)が λ_2 に対しても成立するためには、式(21)が必要となる。

$$\sin \frac{n}{2} \theta' = \sin \frac{n}{2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \theta = 0 \quad (21)$$

したがって

$$\frac{n}{2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \theta = l\pi \quad (l: \text{整数}) \quad (22)$$

式(22)を式(19)に代入すると

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} m = l \quad (23)$$

となる。たとえば光源としてHe-Ne, Arレーザを用いて $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.4880 \mu\text{m}$ とすると、 $\lambda_1/\lambda_2 \approx 1.3$ となる。したがって式(23)をほぼ満足する最小の m の値を求めると $m=3$ となる。この値を式(19)に代入すると

$$\theta = \frac{6}{n} \pi \quad (24)$$

となる。つまり $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$ の3波長を n 等分した段階位相でランダム・フェーズ・シフタを作成すればよいことになる。これは $\lambda_2 = 0.4880 \mu\text{m}$ のほぼ4波長分

に担当しており、 λ_1 と λ_2 の最小公倍数にほぼ等しい範囲に段階位相が平均分布していることを意味する。異なる波長の光がさらにふえた場合でも同様の処理で最適のランダム・フェーズ・シフタが得られる。

7. 超高分解能情報のホログラフィ記録

ここでは、非常に細かい文書などの超高分解能が要求される情報のホログラム記録について論ずる。ランダム・フェーズ・サンプリング法が、画像の高密度記録に最適な手法であることは前述した。この手法では通常の画像に比較してさらに分解能のよい像質が必要とされる場合には、サンプル点の数をふやして行けばよいことになる。ただし一面のサンプル点数は、技術的にもある限界が考えられるので、たまたま情報がこの限界以上に細かい構造を多くもつ場合には像質がある程度不十分になってしまうことがありうる。このような場合は少なくとも日常TVなどで肉眼が見取っている情報のレベルでは存在しない。しかし、こうした情報に対してでも、より高品質なものが望まれることが全くないことはないので解決策を考えておく必要がある。その一案としてこれから述べるアナログ・ランダム・フェーズ・シフタがある。

7.1 アナログ・ランダム・フェーズ・シフタ法²³⁾²⁵⁾³⁸⁾

この方法は2次的に連続変化する位相分布を有し、しかも帯域制限の行なわれているランダム位相板(アナログ・ランダム・フェーズ・シフタ)を用いる方法である。その構成はFig.5と同様でメッシュとランダム・フェーズ・シフタの代わりにアナログ・ランダム・フェーズ・シフタを配置すればよい。この方法は基本的にすべての情報をホログラム中にとり入れるという考え方に基づいている。詳細な説明は参考文献にゆずり²³⁾²⁵⁾ここでは概略を説明する。位相板は具体的には従来のランダム・フェーズ・シフタの不連続位相接続部を、有限でランダムな傾斜を有した曲線で表わされる位相関数でなめらかに接続したものである。この位相板を用いた場合のフーリエ面での情報光強度分布を考えてみる。位相板中の位相のフラットな部分については従来のランダム・フェーズ・シフタと同じ扱いで考えればよい。位相の斜め部分を通じた情報光はフーリエ面上で中心から高周波側にずれて分布する。傾斜の値がランダムである場合には、このずれの大きさは各情報光によって異なるので特定の位置に情報光が集中することはない。結局、フーリ

エ面上での情報光の分布はこれら2つの部分を通じたものの位相を考慮した和になるので、全体として均一分布となる。この傾きの大きさが位相板のポイントとなるわけであるが、計算の結果その最大値 G_{max} が式(4)で表わされるものとなればよいことがわかった。

$$G_{max} = \pi / \omega \quad (25)$$

ここで ω は情報の有する最小構造の径である。以上の条件の場合のホログラム径 r_0 は ω に対する Airy Disk 径より多少大きめになる。これは位相の斜め部分による径の広がりがある程度生じていることによる。したがって、多少の記録密度の低下はあるが十分分解能は確保できる。この種のランダム位相板の効果に関する一般的著述は Upatnieks²⁰⁾ らによってなされているが、具体的に実現したものでは本方式の位相板が初めてであろう。

7.2 実験結果

計算で得られた位相形状を具体化する手段としてつぎのような試みを行なった。従来のランダム・フェーズ・シフト用の蒸着マスクをガラス基板からある距離隔てた状態で支持し、これを通してガラス基板上に透明誘電体を蒸着させた。この距離と蒸着物質と蒸着との位置を適当に選ぶことによって所定の形状が得られる。Fig. 18 に、位相板の干渉顕微鏡拡大写真を示す。つぎに情報

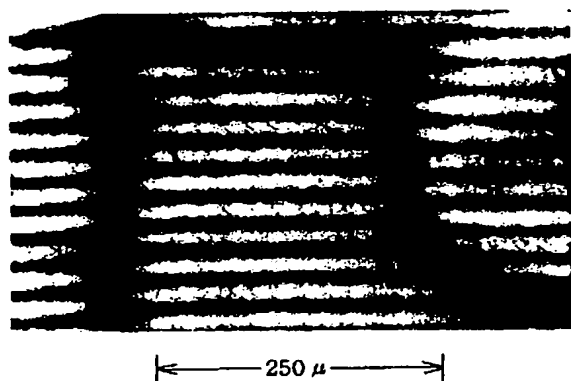


Fig. 18 アナログ・ランダム・フェーズ・シフトの干渉顕微鏡拡大写真 ($\times 200 \times 2/3$)

として A 4 判の文献 1 頁を用い実験を行なった。使用レーザは Ar, レンズは $F=1.4$ である。得られたホログラムのサイズは 1.3 mm , 回折効率は 10% であった。記録密度は英数字で 10^4 字/mm^2 となる。このデータは過去に報告された最高の記録密度のデータを 3 倍以上上回っている。Fig. 19 に漢字情報の場合の再生像の一例を示す。

8. ホログラフィックな高密度画像記録技術の応用

これまで論じてきた各種のホログラフィックな高密度画像記録技術が具体的にどのような応用方面へ生かされて行くかを 2, 3 の例を引用しながら、最後に簡単に触れてみよう。

大きく分けて応用範囲は 2 つの方向がある。第 1 は従来のマイクロフィルム等に対抗して行く高密度画像ファイルの方向、第 2 は高密度ビデオパッケージを目的とする方向である。以下、各々について実例を挙げて論じて行く。

まず第 1 の方向の例として、McMahon の Holographic Ultrafish²⁵⁾, ならびに筆者らの高密度画像情報ファイル等がある。前者はデフォーカス法でホログラムを作成することによって、A 4 判換算で 20 頁/cm^2 の記録密度を得ている。しかしながら回折効率の不足から像が暗く、将来展望として CCTV を利用することを提案している。後者はランダム・フェーズ・サンプリング法による高密度画像ホログラム 20 種類を内蔵する原理モデルである。ホログラムは 5 枚のプレート上に各 4 個ずつ配置されており、各プレートは金属ディスク上に配列されている。情報の読み出しはディスクの回転と、4 個のホログラムから 1 個を読出すミラー偏向器のランダムアクセスで行なわれる。装置の写真を Fig. 20 に示す。この装置での情報記録密度は 50 頁/cm^2 である。これらの装置はいずれも従来のマイクロフィッシュと比較して同等もしくはそれ以上の記録密度を有しており、ホログラムの自己結像性などの機能を生かすことによって読出しレンズがいなくなるなど、大幅な装置の簡略化を期待することができる。

つぎに第 2 のビデオパッケージへの応用例について触れる。その代表的なものは何といても RCA のセレクトビジョン²⁾であろう。フォトレジスト材料でホログラムを作成すれば凹凸面で情報の記録ができ、これからニッケルなど金属マスクパターンを作成し、プレスでビニールテープに複製を作れる。これを家庭用ビデオテープにしようとするものである。このビデオテープは $14 \times 7 \text{ mm}^2$ のホログラム 2 個で画面 1 コマが構成されている。各ホログラムは前述したマルチプル・オブジェクト・ビーム法で作成されており、各々画像の輝度信号ならびにカラー信号を記録している。Fig. 21 にこのホログラムの再

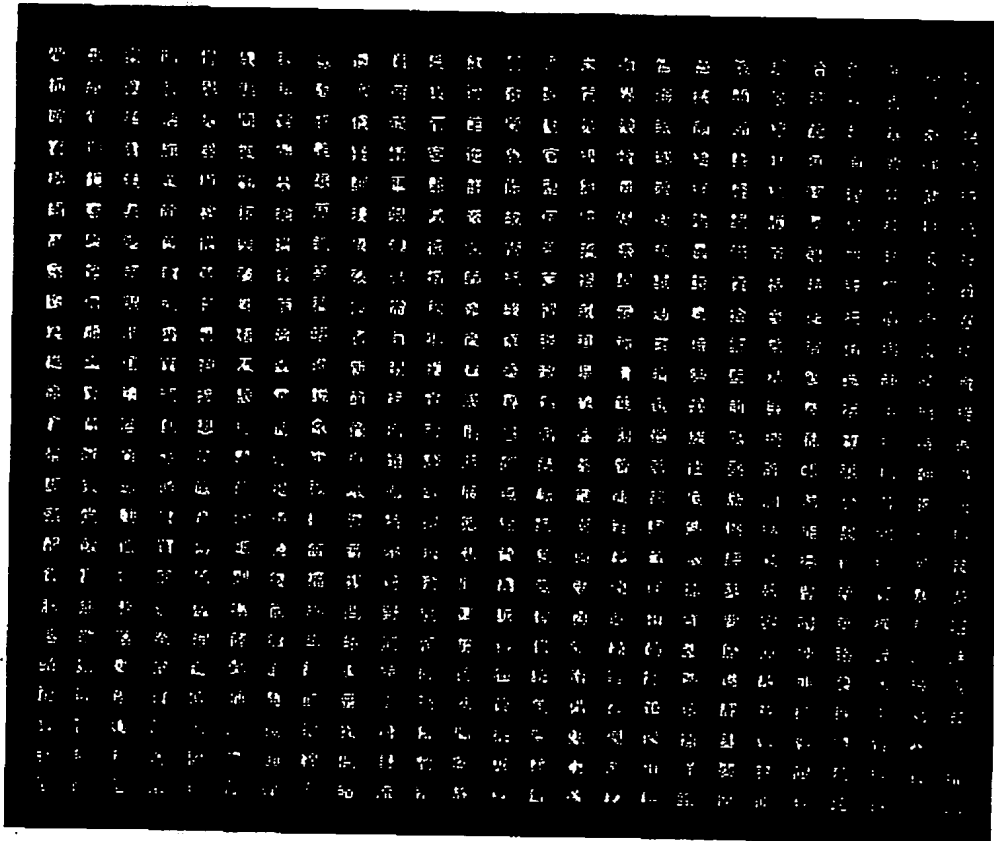


Fig. 19 超高分解能文字情報ホログラム再生像
(ホログラム径 1.3 mm)

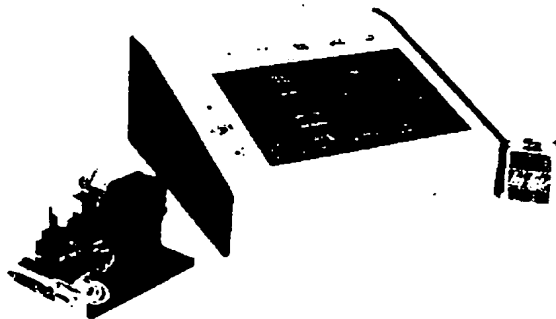


Fig. 20 高密度画像情報ファイルと検索用キーボード

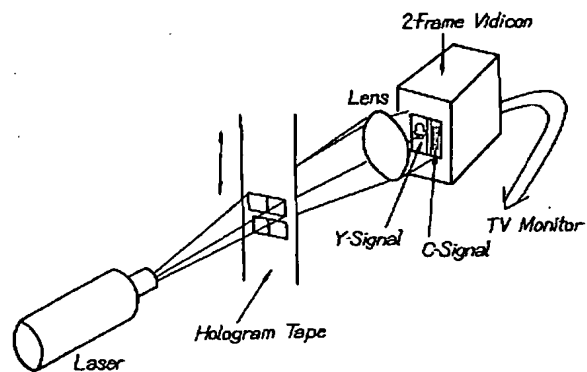


Fig. 21 セレクトビジョンの再生方法

生過程を示す。小型 He-Ne レーザがビデオテープを照明すると、テープからは画像の輝度とカラー情報が各々再生されて 2 フレームビジコン上に結像する。ここでとり出された信号は合成回路を通してカラーテレビモニタ

上に像を形成する。この方式のビデオパッケージは当初もっとも安価なテープを作りうる可能性を有し、極めて有望と見られていたが、この分野のマーケット情勢の複雑さから、なお VTR, EVR などにとって替るまでに至っていない。

以上、ホログラフィックな高密度画像記録技術の応用について実例を示しながら説明してきたが、各装置はいずれも現状では従来技術にとって替るまで至っていない。しかしながら、ホログラフィ本来の特徴が各々装置の中に生かされており、これらを足がかりとして近い将来主流技術となる可能性は大きいであろう。

9. あ と が き

ホログラフィックな高密度画像記録に関する諸技術の記述を行なった。内容の要点は以下の通りである。

- (1) ホログラフィ手法の特徴を十分に生かした画像記録を行なうには、ホログラムが、①高密度記録、②低雑音(スペckル雑音)、③高冗長度、④高回折効率、⑤高解像度、⑥高階調特性の特徴を満たさなければならない。
- (2) 従来行なわれていたディフューザ法、デフォーカス法、マルチプル・オブジェクト・ビーム法は各々上記特徴のすべてを満足してはおらず完全な手法とはいえない。この中ではマルチプルオブジェクトビーム法が、記録密度が多少劣る点を除いてはすぐれた特性を示しており効果的な手法といえる。
- (3) ランダム・フェーズ・サンプリング法は上記条件を同時に満す効果的な手法の一つといえる。この手法によれば、回折限界の高密度で、高冗長度、高回折効率を保ちながらスペckル雑音を消去し得る。
- (4) 具体的に 10^6 サンプル点のランダム・フェーズ・シフトを試作し、実験の結果A 4判画像を直径2mmのホログラムに記録した。再生像の階調、雑音、解像度ともに良い結果を示した。
- (5) カラー画像の高密度記録手法として、ランダム・フェーズ・サンプリング法を基本とするコンボジット・カラーホログラフィ方式の実験を行なった結果、従来にないい良質の高密度カラーホログラムを得た。また、同実験に用いるカラー用ランダム・フェーズ・シフトに関する理論的記述を行なった。
- (6) 微細構造を有する文書などの超高分解能情報のホログラフィ記録手法として、2次元的な連続変化位相関数を有するアナログ・ランダム・フェーズ・シフトを開発した。それを用いた実験を行なった結果、英数字で 10^4 字/mm²の高密度記録を達成した。
- (7) 以上の各記録技術を基本とした応用装置に関する記述を行なった。その代表例として、ホログラフィック・

ウルトラフィッシュ、高密度画像情報ファイル、セレクトビジョン等がある。

以上記述した内容からわかるように、ホログラフィックな高密度画像記録に関する技術はもはや実用化の一手前までできている。今後はこれらの有力な技術を生かすために、その関連技術たとえば光源、偏向器、感光材料などの技術のレベルとのバランスを考えて、さらにニーズとのタイミングを考えつつ全体の開発を行なってゆくことが重要であろう。

文 献

- 1) V. A. Vitols: IBM Tech. Disclosure Bull., 8, 1581 (1966)
- 2) L. K. Anderson et al.: IEEE J. Quantum Electronics, QE-3, 245 (1967)
- 3) H. M. Smits and L. E. Gallaher: Bell Syst. Tech. J., 46, 1267 (1967)
- 4) C. B. Bruchardt: Appl. Opt., 9, 695 (1970)
- 5) Y. Takeda, Y. Oshida and Y. Miyamura: Appl. Opt., 11, 818 (1972)
- 6) W. C. Stewart, A. H. Firester and E. C. Fox: Appl. Opt., 11, 604 (1972)
- 7) R. Bartolini, W. Hannan et al.: Appl. Opt., 9, 2283 (1970)
- 8) E. N. Leith, J. Upatnieks et al.: J. SMPTE, 74, 893 (1965)
- 9) R. J. Collier, C. B. Bruchardt and L. H. Lin.: Optical Holography, p.204, Academic Press N. Y.
- 10) *ibid.*, p. 351
- 11) E. N. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Amer., 54, 1295 (1964)
- 12) A. Kozma, G. W. Jull and K. D. Hill: Appl. Opt., 9, 721 (1970)
- 13) H. J. Gerritsen, W. J. Hannan and E. G. Ramberg: Appl. Opt., 7, 2301 (1968)
- 14) C. J. Reinheimer and J. P. Copple: Appl. Opt., 10, 1456 (1971)
- 15) D. Gabor: IMB J. of Res. Develop., 509 (1970)
- 16) T. Suzuki and R. Hioki: Japan. J. Appl. Phys., 5, 814 (1966)
- 17) T. Suzuki and R. Hioki: Japan. J. Appl. Phys., 5, 807 (1966)
- 18) A. R. Shuman: Optical Data Processing, p.242, Wiley (1970)
- 19) W. Martienssen and S. Spiller: Phys. Lett., 24A, 126 (1967)
- 20) J. Upatnieks: Appl. Opt., 6, 1905 (1967)
- 21) E. N. Leith and J. Upatnieks: Appl. Opt., 7, 2085 (1968)
- 22) Y. Takeda: Japan. J. Appl. Phys., 11, 656 (1972)
- 23) 角田, 武田: 信学会量エレ研資Q E 72-3 (1972)
- 24) A. H. Firester, E. C. Fox, T. Gayeski, W. J. Hannan and M. Lurie: RCA Rev., 33, 131 (1972)
- 25) 角田, 武田: 電子通信学会論文誌 56C, 299 (1973)